

Topographie 3D des surfaces des pièces fabriquées

Claire LARTIGUE, LURPA



Mercredi 27 septembre 2017

Qualité géométrique des surfaces fabriquées

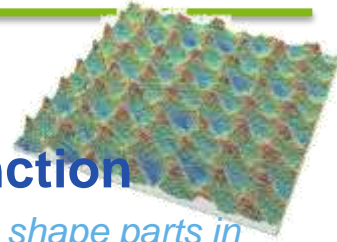
□ Topographies 3D des surfaces usinées

■ Caractérisation topographies en relation avec la fonction

- *Projet FARMAN - IMPACT - Influence of Milling PArameters of Complex shape parts in their surface integrity and their fatigue life Time*

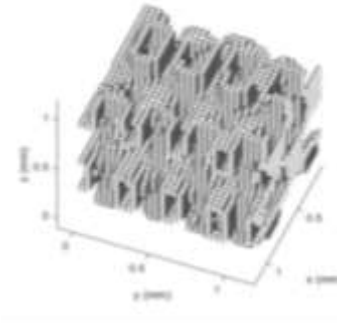
■ Mesure vs simulation

- *Projet FARMAN - SIMSURF - Vers une simulation réaliste des états de surface par calculs massivement parallèles sur processeurs graphiques*



□ Topographie 3D en Fabrication additive

■ Nouveaux challenges en analyse des topographies



Contexte

- Topographie 3D = Texture de surface
- Intégrité de surface = signature résiduelle laissée par le procédé de fabrication
 - Représentée par un ensemble de composantes géométriques et physiques caractérisant la surface et les sous-couches
- Intégrité de surface a une influence sur la fonction : optique, mécanique, esthétique, étanchéité, etc....



Moteurs (frottement, étanchéité)



Prothèse médicale ou dentaire (frottement, innocuité)



Verres solaires (optiques)



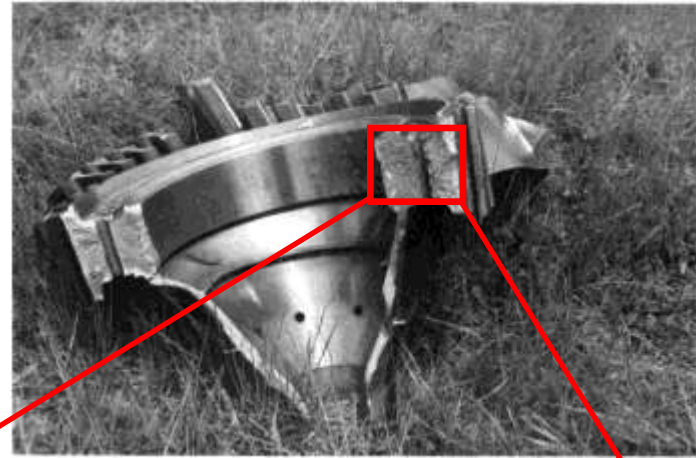
Contexte

Accidents liés à des ruptures en fatigue de pièces « vitales »

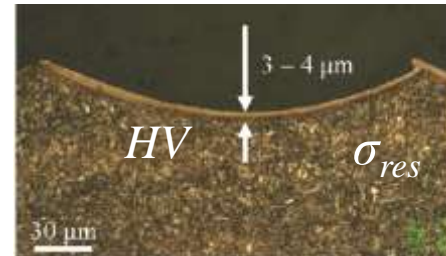
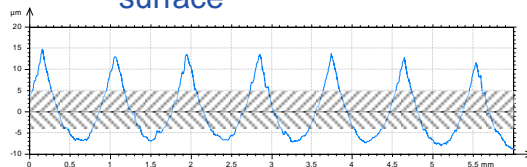
- 6 juillet 1996 : Accident aéronautique à Pensacola, Floride (Etat-unis)

Rupture de fatigue d'un disque fan de moteur

Origine accident: Mauvaise **intégrité de surface** liée à l'usinage



Défauts géométriques de surface



Etat mécanique induit
- Contraintes résiduelles
- dureté, etc

Contexte

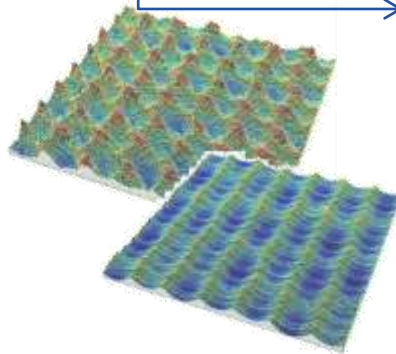
□ Problématique générale



Procédé

- Paramètres
Outil, Vitesse avance, Vitesse de coupe, orientation outil, etc
- Stratégie
- Matériau

Relation



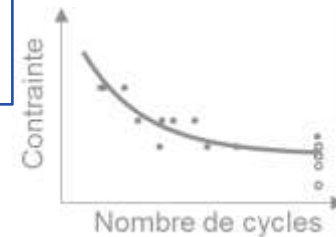
Intégrité de surface

- Etat de surface 3D
- Etat mécanique
- Micro-structure
- Physico-chimie
-

Relation

Fonction de service

- Optique
- Mécanique
- Esthétique
- Tribologie
- etc...



Projet FARMAN IMPACT : 2008-2013

Influence of Milling PArameters of Complex shape parts in their surface integrity and their fatigue life Time - LMT/LURPA

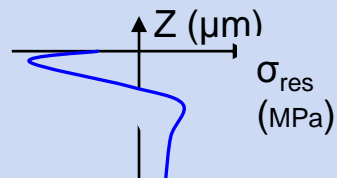
Procédé

Fraisage de finition

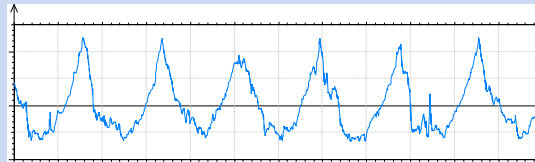


Intégrité de surface

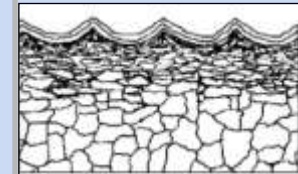
Contraintes résiduelles + écrouissages



Topographie 3D de surface

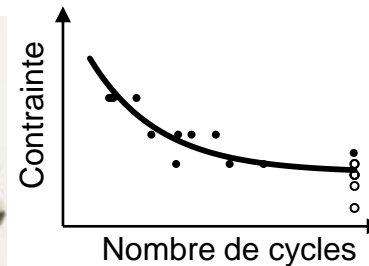


Microstructure



(Aucune altération mise en évidence)

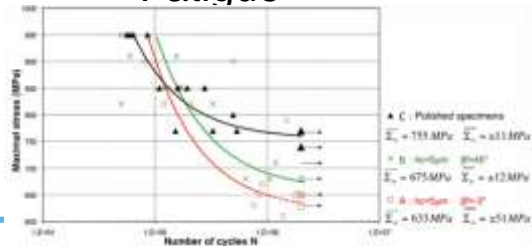
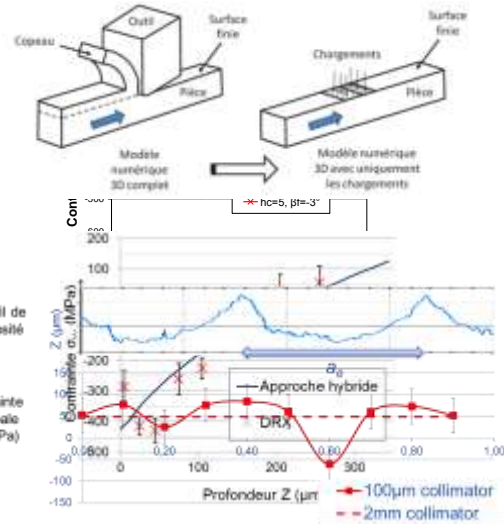
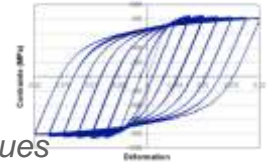
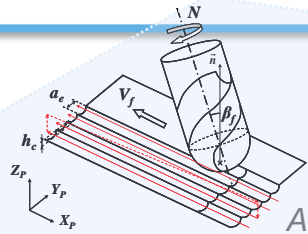
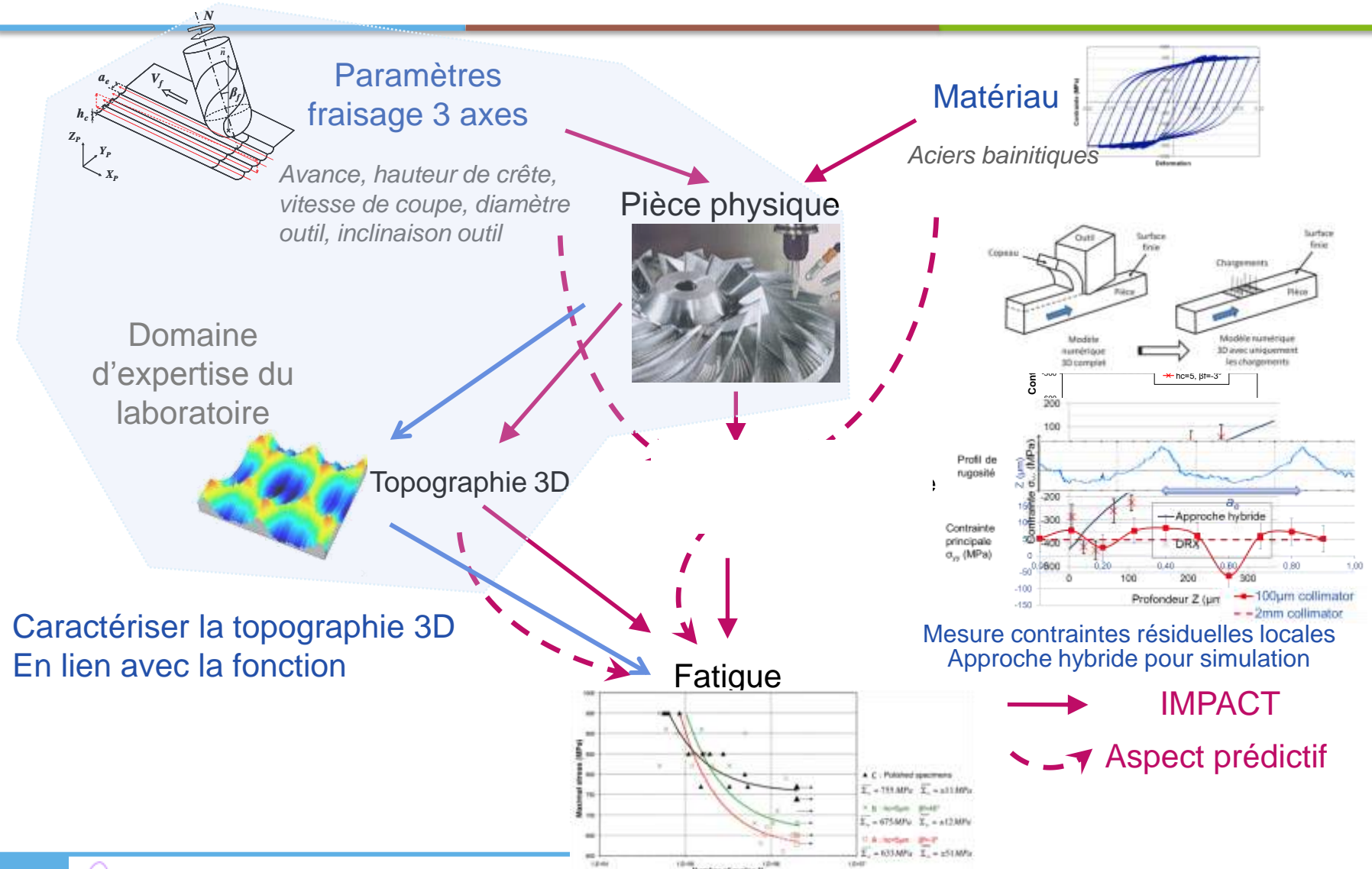
Tenue en fatigue



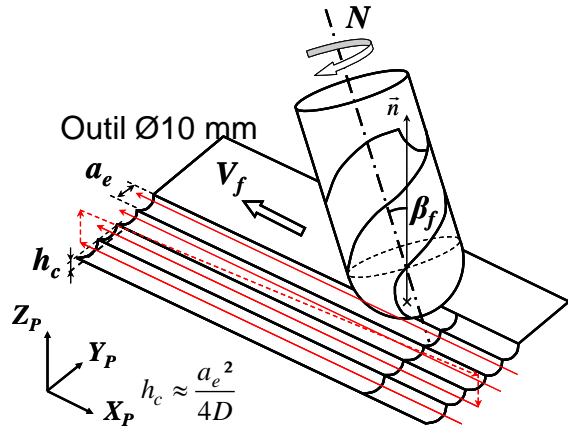
Fonction



Projet IMPACT – Démarche scientifique



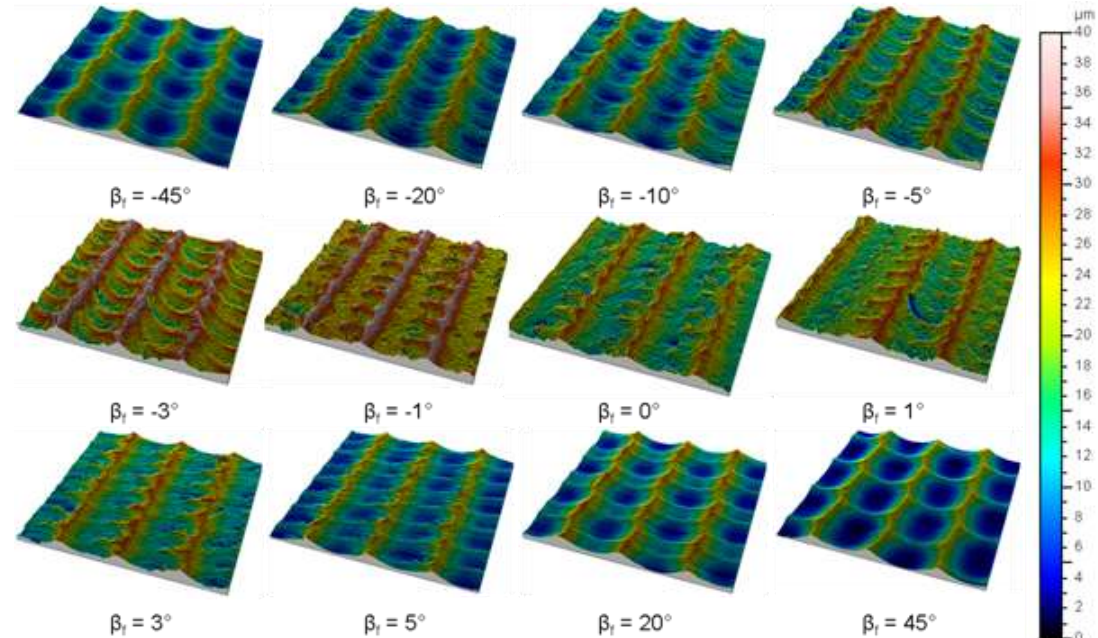
Projet IMPACT : Caractérisation des topographies 3D



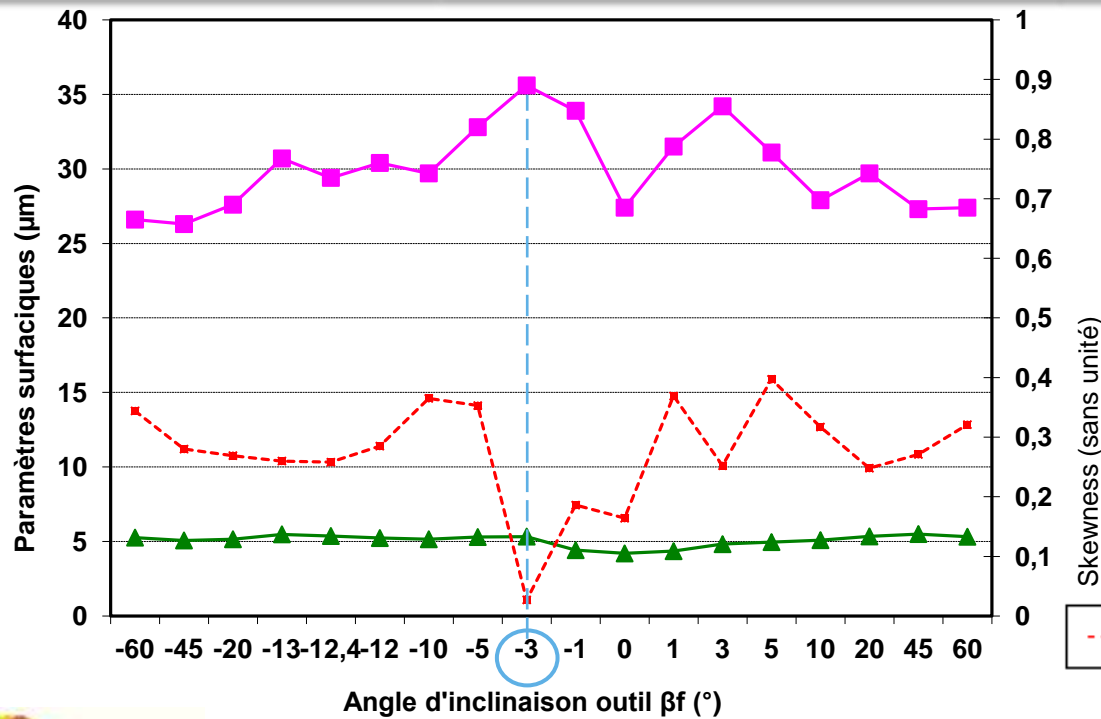
V_c (m/min)	300
f_z (mm/tooth)	0.2
h_c (μm)	20
Depth of cut a_p (mm)	0.5
Inclinaison β_f (deg)	-45, ..., -5, -3, -1, 0, 1, 3, 5, ..., 45

Grand nombre d'essais avec variation des paramètres opératoires

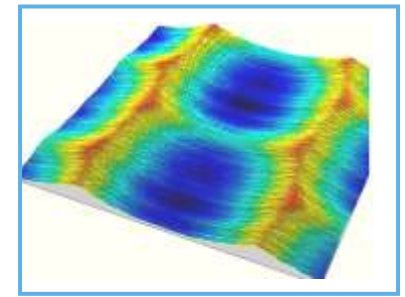
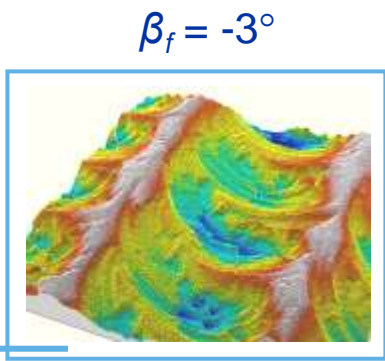
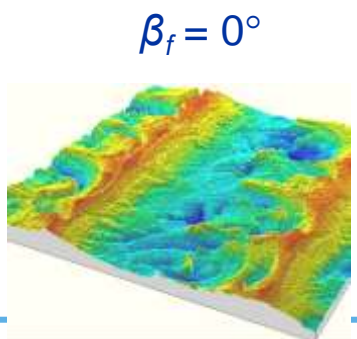
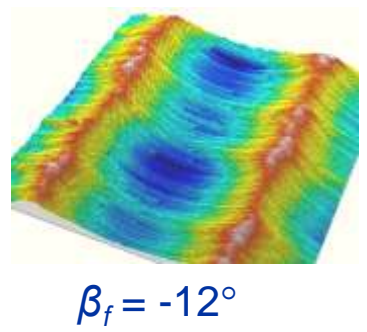
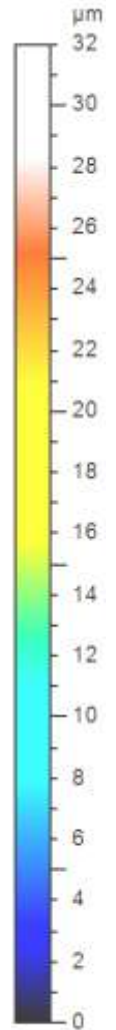
Topographies 3D très différentes selon les paramètres



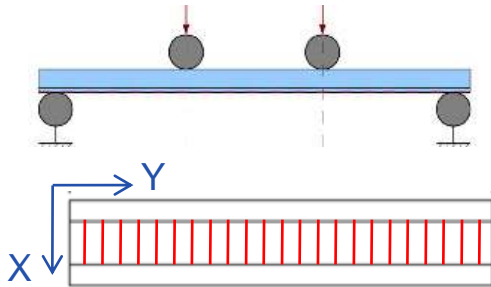
Projet IMPACT – Caractérisation des topographies 3D



Paramètres d'amplitude surfacique	
Sa,	rugosité moyenne arithmétique
St,	hauteur maximale
Ssk,	facteur d'assymétrie



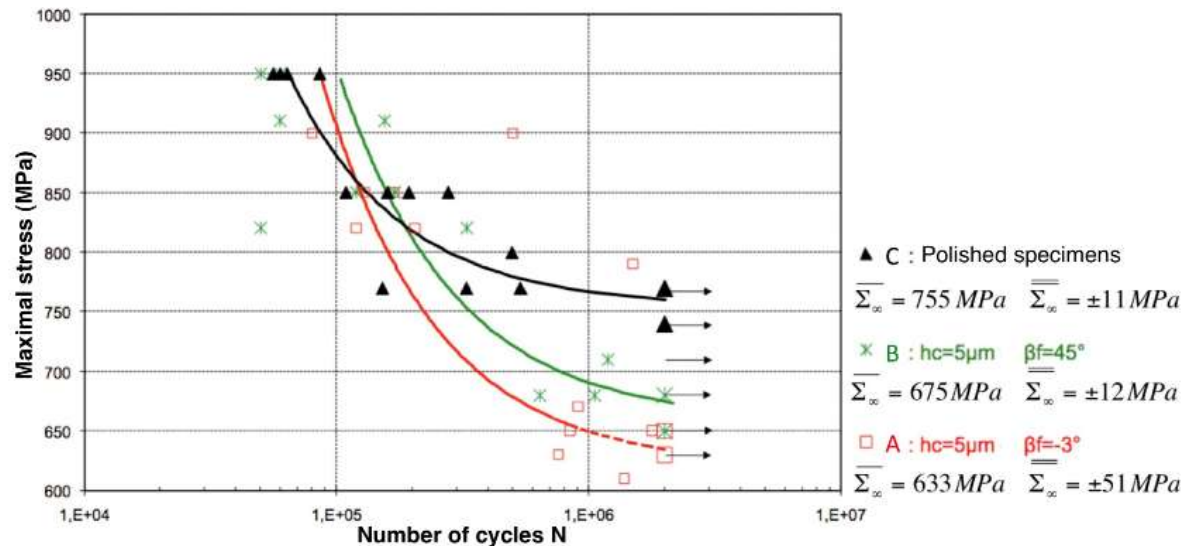
Projet IMPACT – Caractérisation de la topographie



□ Lien micro-géométrie vs Fatigue

- Essais de flexion 4 points

Effet négatif sur la limite en fatigue



Ball-end milling - $f_z = 0.4 \text{ mm}$, $V_c = 300 \text{ m/min}$, $h_c = 5 \mu\text{m}$

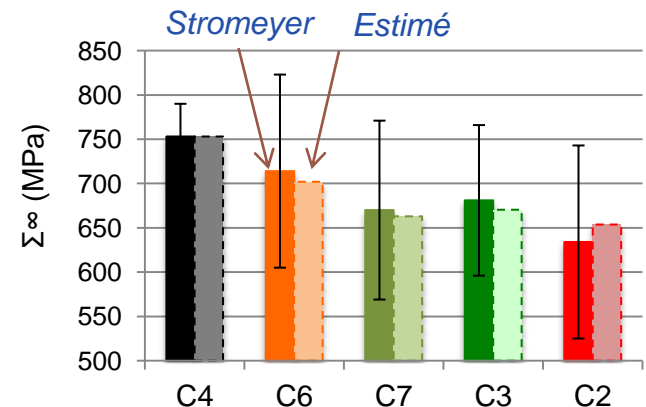
Projet IMPACT – Caractérisation des topographies 3D

□ Proposition d'un facteur de concentration des contraintes en fatigue

- Rôle : indicateur statistique de la quantité de défauts et de leur nocivité
- Paramètres supposés pertinents :
 - $S_{vi} * S_q$ (lié au volume de vide en creux)
 - S_{ku} (lié à la « pointicité » des défauts)
- Introduction d'une taille de défaut critique a_c
Recalage aux valeurs expérimentales pour $a_c = 1,6 \mu m$

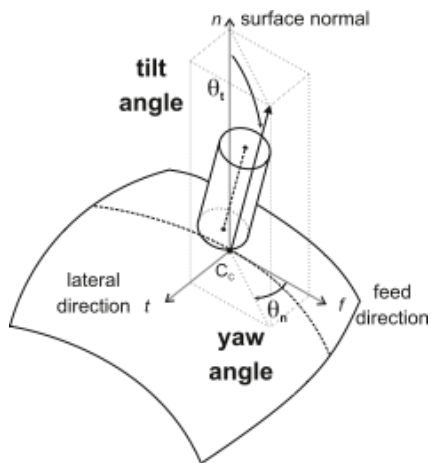


$$\frac{\Sigma_{\text{lisse}}^{\infty}}{\Sigma_{\text{usinée}}^{\infty}} = K_f = 1 + S_{vi} \cdot S_{ku} \cdot \frac{S_q}{a_c}$$



Topographie 3D des surfaces usinées

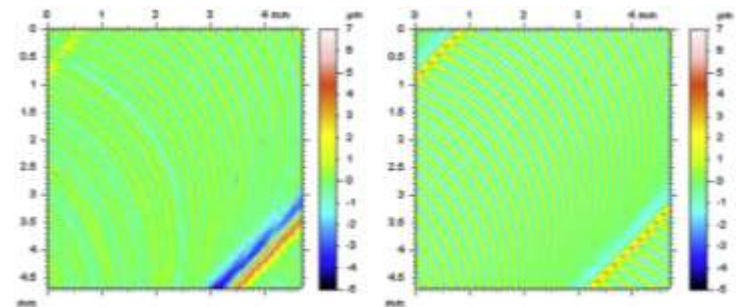
- **IMPACT** : Détermination d'indicateurs pertinents pour caractériser les états de surface mais nombre d'essais important
- **Prédire la topographie 3D de surface : Simulation 5 axes**



Ecarts géométriques de l'ordre du μm

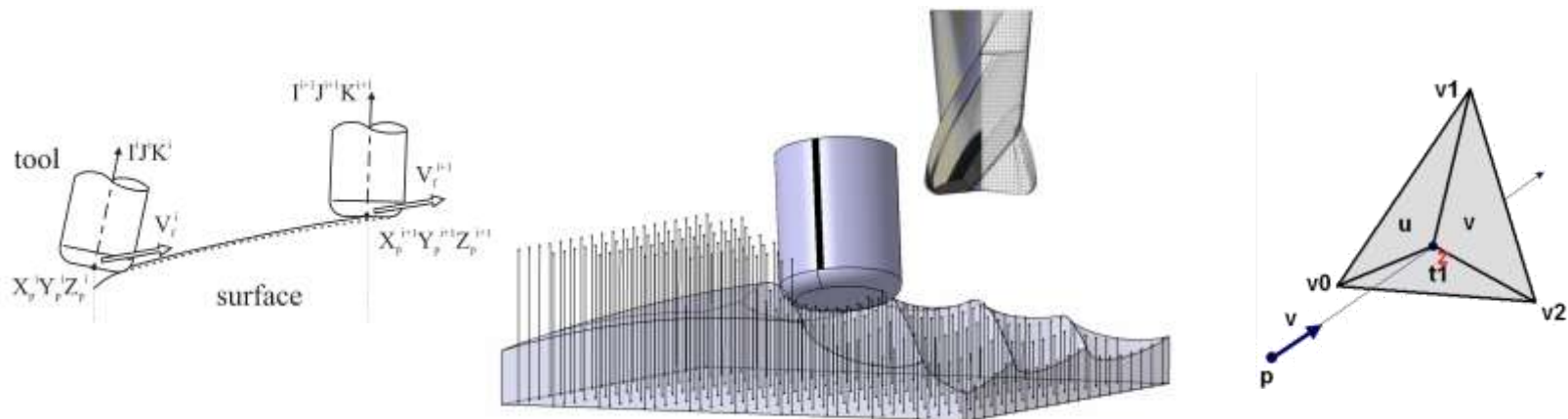
Mesure

Simulation



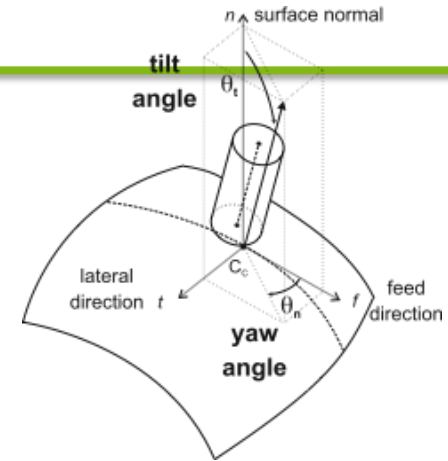
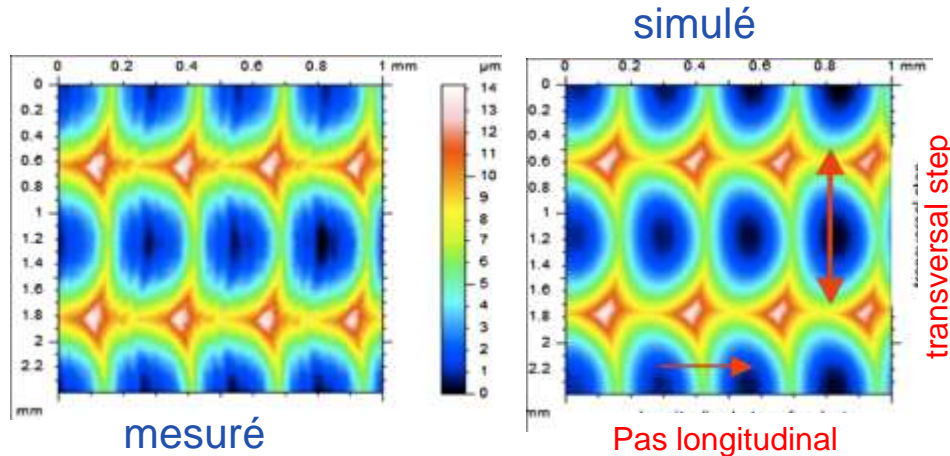
Topographie de surface : Mesure vs Simulation

- Simulation basée sur la méthode du Z-buffer – approche géométrique
 - Pièce = ensemble de lignes verticales (ou normales)
 - Outil modélisé par un maillage (forme parfaite)
 - Echantillonnage de la trajectoire
 - Calcul de la position angulaire de l'arête de coupe
 - Prise en compte de la cinématique (limite de la machine)



Topographie de surface : Mesure vs Simulation

□ Bonne concordance des motifs



$$R_{\text{tool}} = 5 \text{ mm}$$

$$r_{\text{corner}} = 1.5 \text{ mm}$$

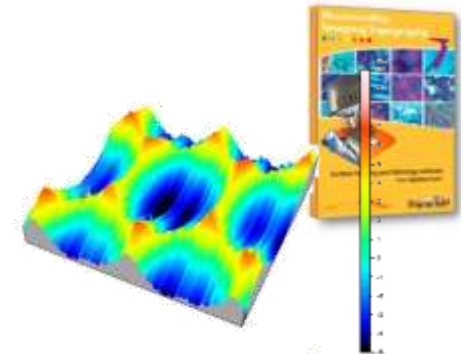
$$f_z = 0.2 \text{ mm}$$

$$\theta_n = 0^\circ, \theta_t = 1^\circ$$

$$h_c = 5 \text{ }\mu\text{m}$$

□ Bonne estimation des paramètres 3D d'état de surface

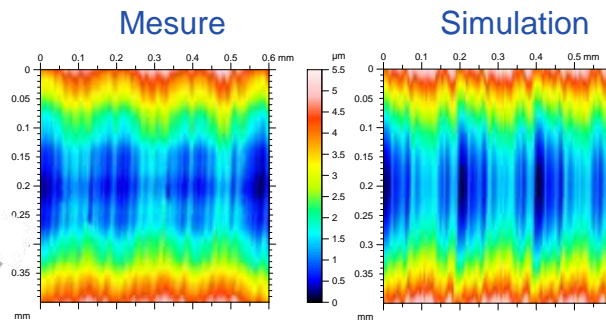
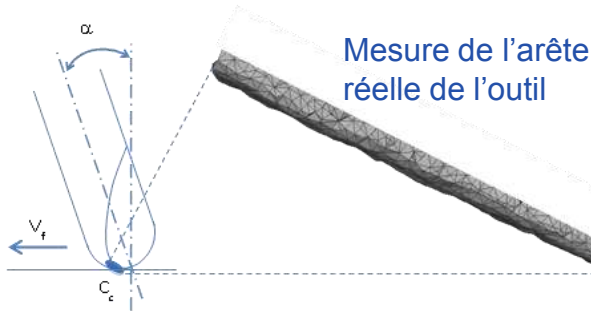
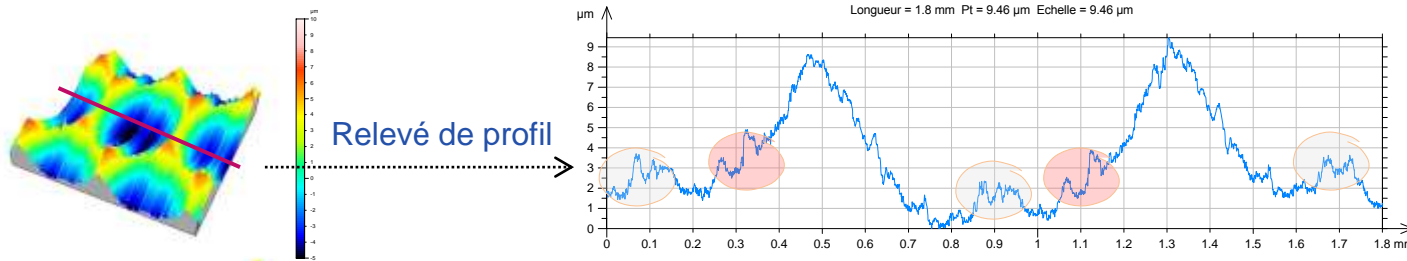
Pas transversal (mm)		Pas longitudinal (mm)		Sz (mm)		Sa (mm)	
mesure	simulation	mesure	simulation	mesure	simulation	mesure	simulation
2.76	2.63	0.13	0.13	2.76	5.58	1.27	1.21



Topographie de surface : Mesure vs Simulation

□ Evolution : prise en compte de la géométrie réelle de l'outil

- Allure générale du profil liée à la géométrie outil (calotte sphère)
- Micro-défauts liés à la géométrie réelle de l'outil (défauts d'outil)
- A une certaine échelle , état de surface stochastique



Résultats satisfaisants

Mais :

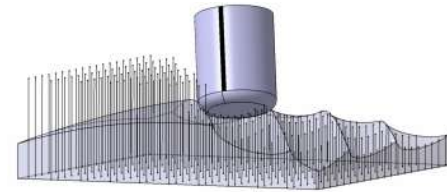
- Temps de calcul long
- Faibles zones évaluées
- Limite approche géométrique (interaction outil/matière, phénomène abrasion, aspects mécanique - multi-physique)

Projet FARMAN SIMSURF (1 et 2) : 2012-2014

Vers une simulation réaliste des états de surface par calculs massivement parallèles sur processeurs graphiques – LURPA/LMT

□ Simulation réaliste des topographies de surfaces usinées par plusieurs opérations successives

- Partition de l'espace en une grille de droites, outil discrétisé, trajectoire échantillonnée
- Géométrie réelle des outils (dents, usure, bris, etc.)
- Ecart dus au processus d'usinage
 - numériques, géométriques, mécaniques
- Simulation des surfaces fabriquées par des procédés d'abrasion
 - Chaque grain est un outil, maillage des grains
 - Interaction avec la matière
 - Modèle stochastique pour simuler les pertes de particules abrasives, intégrer leur usure



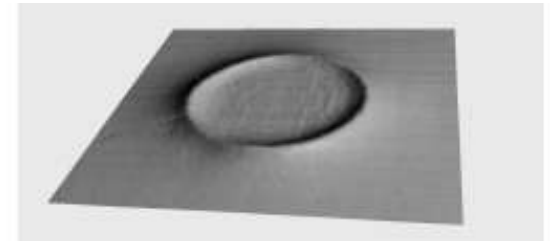
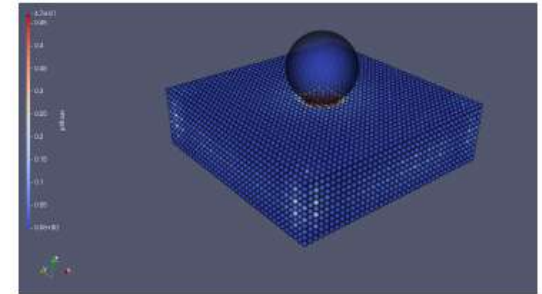
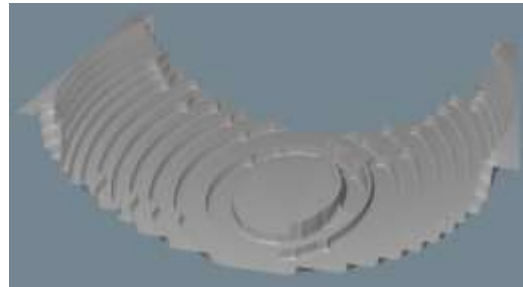
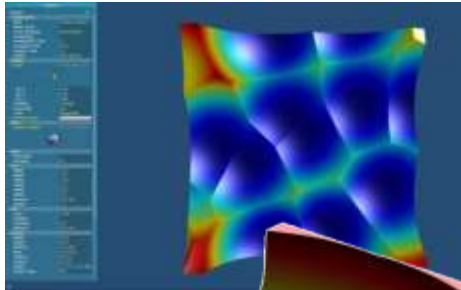
Projet SIMSURF – Utilisation du HPC



Nvidia GPU / CUDA

Nvidia GPU / OptiX Prime engine

SPH simulation /SPHEROS



Prototypage d'un logiciel :

- Calcul massivement parallélisé sur cartes graphiques
- Gestion multi-échelles (zoom calculé en temps réel)

Prototypage d'un logiciel :

- Exploitation d'un moteur de ray tracing
- Simplicité de programmation
- Performances moindres

Exploitation d'un code SPH (*Smooth Particle Hydrodynamics*) en collaboration avec l'EPFL :

- Echelle inférieure pour simuler les états de surface produits par abrasion
- Simuler l'abrasion et l'usure des abrasifs

Axe : Qualité géométrique des surfaces fabriquées

□ Topographies 3D des surfaces usinées

▪ Caractérisation en relation avec la fonction

- *Projet FARMAN - IMPACT - Influence of Milling PArameters of Complex shape parts in their surface integrity and their fatigue life Time*

▪ Mesure vs simulation

- *Projet FARMAN - SIMSURF - Vers une simulation réaliste des états de surface par calculs massivement parallèles sur processeurs graphiques*

□ Topographie 3D en Fabrication additive

▪ Nouveaux challenges en analyse des topographies

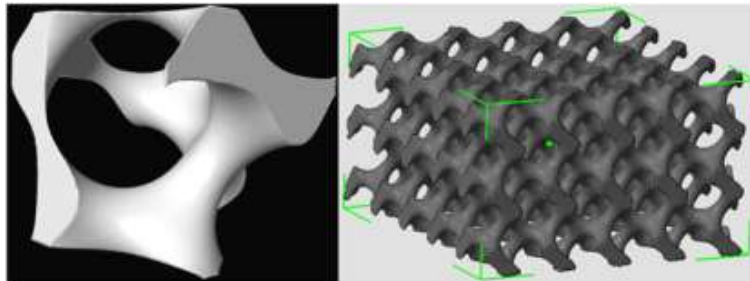
Topographie de surface en FA - *New trends in topography analysis*

□ Nouveau challenge : Etats de surface en Fabrication Additive

▪ Réalisation de pièces de géométrie complexe

□ Exemple : structures lattice

- Cellule élémentaire répétée périodiquement
- Optimisation de la forme (structure) pour obtenir les
- Propriétés attendues (mécaniques, thermiques, acoustiques)

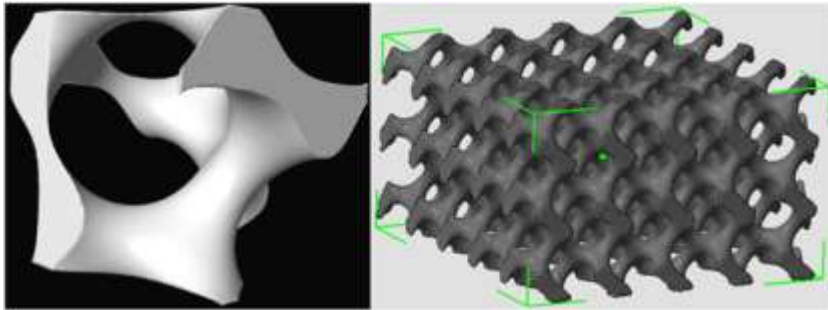


Procédé
Paramètres

Fonction
Mécanique

Topographie de
surface
Surface
interne/externe

Topographie de surface en FA - *New trends in topography analysis*



- Comment caractériser la surface totale : interne et externe?
- Mesure réalisée avec un tomographe - Peut-on étudier la surface à l'échelle de la rugosité avec un tomographe?

Topographie de surface en FA - *New trends in topography analysis*

❑ Peut-on étudier à l'échelle de la rugosité avec un tomographe?

Données volumétriques

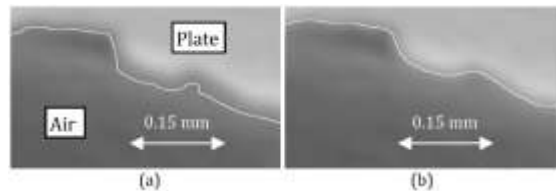
Surface extraction

Analyse

Voxel = pixel 3D
(niveaux de gris)

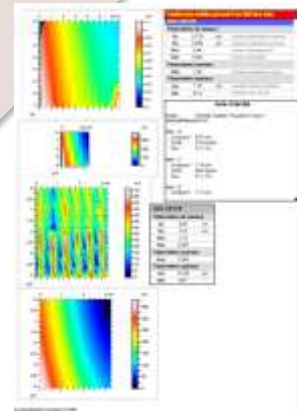
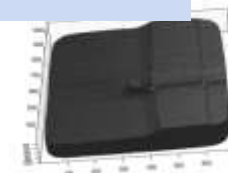


Différentes méthodes d'extraction



Extraction frontière matériau

Extraction points 3D
(Nuage de points)



Cohérence des paramètres calculés

Représentation $z = f(x,y)$

Topographie de surface en FA - *New trends in topography analysis*

Bloc céramique avec face usinée



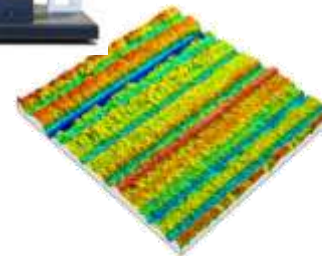
□ Tomographe

- *NSI du LMT – taille du voxel = 21 μm*

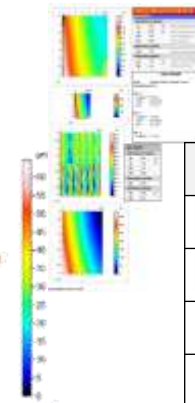


□ Système optique

- *Alicona – résolution < μm*



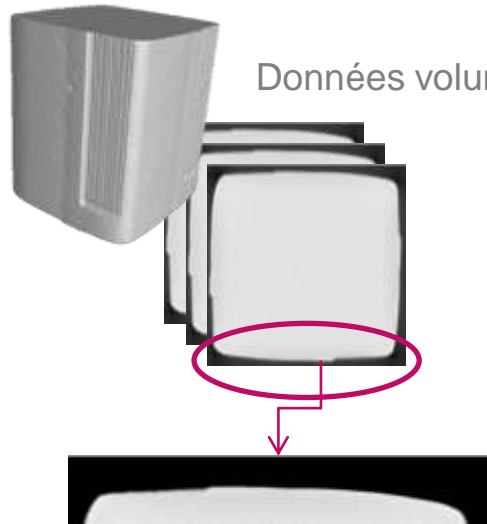
Mesure Alicona



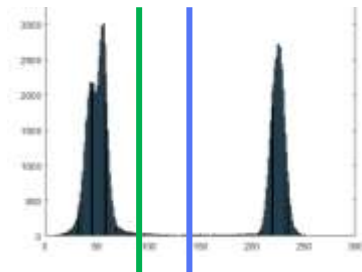
Paramètre	Alicona
Sa (μm)	8,12
Sq (μm)	10,3
Sz (μm)	67,4
Ssk	-0,59
Sku	3,44
Spk (μm)	7,05

Topographie de surface en FA - *New trends in topography analysis*

Données volumétriques

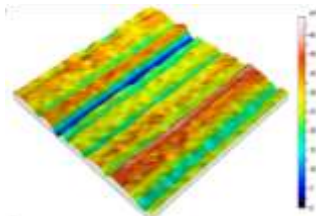


Sélection d'un seuil
(*extraction frontière matériau*)



- Sélection d'une image
- Extraction d'une portion
- Histogramme niveaux de gris
- Choix du seuil (ISO50 ou Ostu)
- Détermination maillage par méthode des marching-cube (nuage de points 3D)
- Calcul des paramètres surfaciques

$$z = f(x,y)$$



Nuage de points 3D
(maillage ; $z = f(x,y)$)

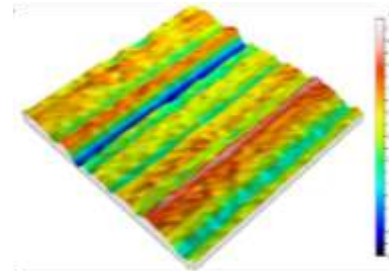
Paramètre	CT seuil 1	CT seuil 2
Sa (µm)	9,46	10,2
Sq (µm)	12,2	13,3
Sz (µm)	87,2	96,6
Ssk	-0,68	-0,71
Sku	3,68	3,82
Spk (µm)	5,03	4,93

Topographie de surface en FA - *New trends in topography analysis*

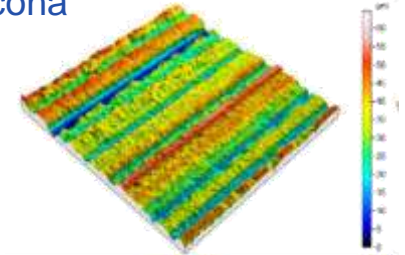
□ Comparaison avec mesures issues du capteur optique

Paramètre	Alicona	CT seuil 1	CT seuil 2
Sa (μm)	8,12	9,46	10,2
Sq (μm)	10,3	12,2	13,3
Sz (μm)	67,4	87,2	96,6
Ssk	-0,59	-0,68	-0,71
Sku	3,44	3,68	3,82
Spk (μm)	7,05	5,03	4,93

Tomographe



Alicona



- Résolution moins bonne avec CT (taille du voxel)
- Ordre de grandeur très cohérent des paramètres
- Légère influence du choix de la valeur seuil
- Résultat dépend de la nature de la topographie de surface

Peut-on étudier à l'échelle de la rugosité avec un tomographe? **Résultats plutôt positifs**

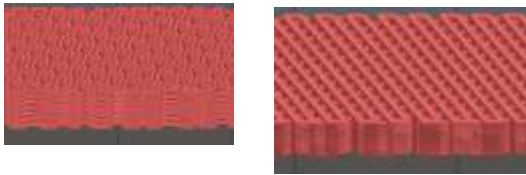
Mais travaux à mener :

- Résolution en CT – amélioration numérique
- Calcul des paramètres sur la surface complète

Topographie de surface en FA - *New trends in topography analysis*

- Comment caractériser la surface totale (incluant la porosité)?
 - *Et faire le lien avec le procédé (FFF)*

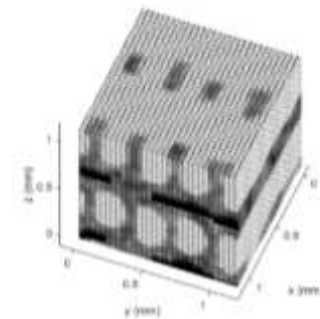
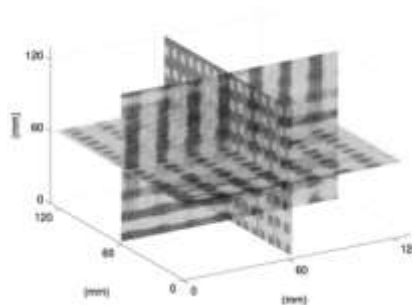
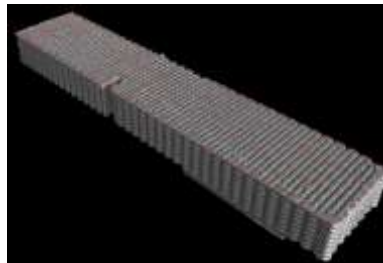
3 stratégies de remplissage



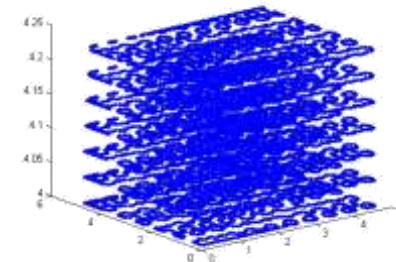
ep = 0,25mm
taux remplissage = 60%



Mesure au Tomographe



Voxel map

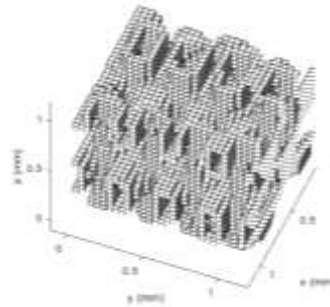
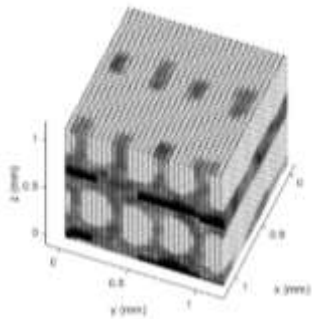


Nuage de points

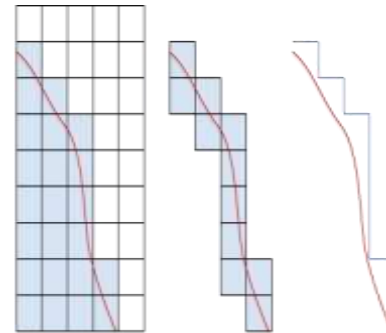
Topographie de surface en FA - *New trends in topography analysis*

- Comment caractériser la surface totale (incluant la porosité)?
 - Et faire le lien avec le procédé (*Fused Filament Fusion - FFF*)

Extraction de la surface à partir des voxels



Identification des voxels de peau



Surface Spécifique
(surface réelle par unité de volume)

$$SSA = \frac{A}{V_{tot}}$$

$$A = \sum_{i=1}^{V_{skin}} \sum_{j=1}^6 A_{i,j} \cdot \delta_{i,j}$$

Volume total

Stratégie	SSA (mm ⁻¹)
Zig-zag	13
Nid d'abeille	8,5
Hilbert	4

- Lien avec caractéristiques mécaniques (plan d'expérience)

Conclusion

- **Topographie 3D des pièces usinées**
 - **Caractérisation en relation avec la fonction**
 - *Détermination d'indicateurs pertinents (en relation avec la fatigue)*
– projet IMPACT
 - **Mesure vs simulation**
 - *Simulation des topographies réalistes – Projet SIMSURF*
 - *Vers la simulation multi-modèles (géométrique et mécanique)*

- **Nouveaux challenges en Fabrication additive**
 - **Caractérisation de la surface interne et externe**
 - *Expérimentation positive des méthodes de mesure par tomographie*
 - *Proposition d'indicateurs pour décrire la surface réelle*
 - *Lien état de surface – caractéristique mécanique*



Mercredi 27 septembre 2017

Merci de votre attention